

El Premi Nobel de Física 2006: altre cop la radiació còsmica de fons

Eduard Salvador*

Introducció

Els astrofísics nord-americans John C. Matter, del Godard Space Flight Center de la NASA, i George F. Smoot, del Lawrence Berkeley Laboratory, han obtingut el Premi Nobel de Física d'enguany pel descobriment de la forma de cos negre i l'anisotropia de la radiació còsmica de fons. Ambdós acabaven de rebre, el passat mes d'agost, els premis Grubber de cosmologia, la qual cosa feia presagiar que aquest any, per fi, obtindrien el més preuat dels guardons. I és que, si més no en el camp de la cosmologia, ningú no dubtava que tard o d'hora l'aconseguirien. L'únic que potser jugava en contra era el fet que el descobriment de la radiació còsmica de fons, d'ara endavant l'RCF, ja havia estat objecte del mateix premi l'any 1978. De fet, fins i tot pot sorprendre que contribucions tan properes puguin haver estat premiades en dues ocasions. Tot s'entén, però, si es té en compte que qualsevol avenç significatiu en la direcció de respondre a les clàssiques preguntes «d'on venim» i «on anem» és sempre molt ben rebut.

Efectivament ha estat gràcies als descobriments fets entorn de l'RCF que la nostra concepció de l'Univers ha transcendit definitivament el camp de l'especulació per esdevenir ciència de ple dret. Aquests descobriments han fet que el model cosmològic vigent, l'anomenat *model del Big Bang*, sigui avui dia tan cèlebre i quotidià que la gent el dona per segur tot i ignorar en què es basa i què és el que ha fet que s'acabés imposant. Doncs bé, cal dir que ha costat molt que la comunitat científica l'acceptés. Això és degut al fet que, segons aquest model, el nostre univers tindria una edat finita, la qual cosa resulta absolutament incòmoda per a un científic no ja d'avui dia sinó de qualsevol època. El concepte d'un univers amb edat finita només pot ser acceptat si no queda més remei, si l'observació astronòmica i la te-

oria física ho fan palès de manera indiscutible, i això és exactament el que ha succeït.

La vella idea d'un univers immutable

Com tothom sap, la ciència moderna té les seves arrels en el pensament grec de l'antiguitat. Els grecs van ser els primers a aplicar la lògica en el raonament deductiu a partir de principis induïts —o intuïts— cercant la màxima simplicitat i bellesa a l'hora d'intentar explicar el món físic que ens envolta. Aquest mètode racional, és a dir, basat en la suposició, avui dia evident per simples raons evolutives, que la ment humana està ben adaptada a l'entorn en què es mou, els va permetre d'escapar, per primer cop en la història, a l'intent d'explicar la realitat apel·lant a raons mitològiques plenes de prejudicis difícils de canviar. L'èxit del nou mètode va ser tan clamorós que en pocs segles es va avançar més en la comprensió de la natura que en tots els mil·lennis precedents. De fet, si no es va avançar encara més va ser perquè, a la fi de l'imperi romà, la ciència va caure altra vegada sota la influència de la religió, la qual va imposar novament frens i prejudicis difícils de superar.

El redescobriments del pensament grec que es va produir al Renaixement va tornar la ciència al bon camí de la racionalitat deslligada de la religió i la mitologia. És en aquest moment quan es van assentar les bases per a la construcció d'un veritable model científic d'univers, diferent dels models mitològics anteriors o dels primers assaigs per part dels aristotèlics. Paradoxalment, va ser l'èxit del pensament racional deslligat dels prejudicis religiosos el que va acabar retardant, però, la plena aparició d'una cosmologia física.

És ben conegut que Nicolau Copèrnic va posar les coses al seu lloc en comprendre que la Terra no era pas el centre de l'Univers. En aquella època l'Univers conegut era ben petit, es limitava a la mateixa Terra, el Sol, la Lluna i els cinc planetes que es veuen a ull nu, movent-se sobre el teló de fons immutable dels estels (vegeu la figura 1). Copèrnic va descobrir que, si se situava el centre de l'Univers al Sol i no pas a la Terra, el moviment aparent de tots els astres quedava perfectament explicat si aquests descrivien òrbites circulars, sense requerir la

***Eduard Salvador** (Barcelona, 1953) és catedràtic d'Astrofísica de la Universitat de Barcelona (UB). Ha estat president de la Sociedad Española de Astronomía (SEA) i president fundador de la Confederación de Sociedades Científicas de España (COSCE). En l'actualitat és responsable de la Unitat Associada de l'Institut de Ciències del Cosmos de la UB amb l'Institut de Ciències de l'Espai del CSIC i coordinador del màster d'Astrofísica, Física de Partícules i Cosmologia.



Figura 1: Representació de l'Univers segons un pintor de l'edat mitjana on queden palesos els problemes que ocasionava el fet de creure que els estels no eren més que un teló de fons

complicada teoria dels epicles. L'Univers era doncs realment bell i senzill com creien els grecs. Les òrbites eren corbes perfectes, és a dir, circulars, de manera que tots els seus punts són iguals i el moviment s'hi pot donar eternament sense que res canviï mai. En aquest sentit podríem dir que Copèrnic va ser el millor o, si més no, el darrer aristotèlic de la història.

Evidentment, si la Terra no era el centre de l'Univers i si la perfecció del cercle consistia en el fet que no tenia punts privilegiats, tot apuntava que el Sol tampoc podia ser-ho. Com havia proposat pocs anys abans Giordano Bruno, al preu de la seva pròpia vida, potser el Sol no era res més que un estel com tots els altres astres lluents que poblen el cel nocturn. La idea que els estels són astres similars al Sol però molt més llunyans no va poder ser demostrada fins uns segles més tard. Però és evident que tots els científics de l'època la consideraven molt seriosament. El mateix Isaac Newton ho va fer sense dubte quan va definir els sistemes de referència inercials com aquells que es mantenen amb velocitat uniforme respecte als estels «fixos». Perquè els estels poguessin ser fixos malgrat la pròpia atracció gravitatòria que Newton preconitzava, calia que omplissin l'Univers amb densitat uniforme —i encara no seria estable. Tanmateix, Newton no es va atrevir mai a afirmar-ho explícitament. El motiu és que si s'acceptava la idea tan simple i bella, és a dir, tan «grega», de suposar els estels distribuïts uniformement dins l'espai infinit aleshores s'arribaria a la contradicció, ja notada per Kepler uns anys abans i coneguda avui dia com a *paradoxa d'Olbers*, que el cel hauria de ser infinitament lluent. Així és que Newton no va gosar elevar al rang de model cosmològic la idea d'univers que es despenya de la seva mecànica.

Avui dia sabem que la solució a la paradoxa d'Olbers no és altra que l'edat finita de l'Univers: la llum no pot haver recorregut una distància infinita des dels inicis dels temps i, per tant, el nombre d'objectes lluminosos que podem copsar en una determinada direcció és limitat. Però ni Newton, ni Einstein uns segles més tard, ni cap altre científic amb cara i ulls hauria pogut acceptar mai que el temps pogués tenir una frontera. Els grecs creien en un espai i un temps homogenis, és a dir, amb tots els seus punts equivalents i, a més, infinits. Aquesta darrera propietat era la que els permetia d'escapar de la incòmoda pregunta de «què hi ha més enllà», o de «què hi havia abans». Estrictament no calia que fossin infinits; només calia que no tinguessin fronteres. En aquest sentit no hi ha cap dubte que, si haguessin conegut les geometries corbades, els grecs haurien acceptat sense cap problema la idea d'un espai homogeni i finit però il·limitat com la superfície d'una esfera a dues dimensions. El que mai no haurien pogut acceptar, però, és que el temps pogués ser finit. De què hauria servit llavors que les òrbites fossin circulars si no s'haguessin pogut recórrer eternament sense que res canviés. D'altra banda, no hauria servit de res que les línies temporals poguessin ser homogènies i finites però il·limitades com els cercles. En aquest cas tampoc hi haurien fronteres temporals però la manca de causalitat a la qual això abocaria seria encara més greu.

El model del Big Bang

Com dèiem, ni el mateix Einstein podia acceptar la idea d'un inici en el temps. Per aquesta raó, quan a principi del segle XX va desenvolupar la *relativitat general* i va voler aplicar-la en el que havia de ser el primer model cosmològic de la història explícitament proposat des de la física, Einstein va suposar que l'Univers era espacialment homogeni i isòtrop i alhora estàtic, exactament com hauria fet Newton si s'hi hagués atrevit. El que feia possible que Einstein pogués proposar aquest model i no pas Newton era el fet que la relativitat general, a diferència de la teoria de la gravitació universal, permetia d'imposar l'estaticitat d'un univers homogeni isòtrop i alhora la seva estabilitat a base d'introduir una constant no nul·la en les equacions, que per aquest motiu rebria el nom de *constant cosmològica*. Aquesta constant produïa, efectivament, una repulsió d'origen geomètric capaç de compensar l'atracció gravitatòria de la mateixa massa i energia que pobla l'Univers. Cal notar, però, que el model cosmològic d'Einstein no aconseguia resoldre la paradoxa d'Olbers, la qual cosa no semblava preocupar gaire el gran físic, poc acostumat com estava a raonar en termes astronòmics.

Però si el model d'Einstein no acabava de ser plenament satisfactori, sí que ho era, en canvi, un model que el matemàtic i meteoròleg rus Alexander Friedmann va proposar poc després, utilitzant la mateixa relativitat general d'Einstein, en el qual se suposava també que l'U-

nivers era homogeni i isotrop però no estàtic. En aquest model, no calia cap constant cosmològica per aturar el moviment de l'Univers simplement perquè l'Univers estava en moviment: l'Univers s'expandia desacceleradament des d'un instant inicial de densitat infinita. El fet que en aquest model l'Univers tingués un inici en el temps arreglava la paradoxa d'Olbers; tanmateix, Einstein es resistia a acceptar un model que suposava un inici en el temps. De fet, ni el mateix astrònom americà Edwin Hubble, autor del descobriment que la llum de les galàxies està desplaçada cap al roig com si s'allunyessin de nosaltres, com si l'Univers s'expandís, podia acceptar el model cosmològic de Friedmann. No podia ser de cap de les maneres que l'Univers tingués un origen en el temps. Això trencava amb la idea més fermament arrelada en el pensament racional grec d'un univers homogeni i sense fronteres tant en l'espai com en el temps.

La resistència a acceptar el model de Friedmann va fer que, durant els quaranta anys següents, el model cosmològic vigent fos el proposat per Hoyle, Bondi i Tolman, segons el qual l'Univers era homogeni i isotrop, com de costum, però estacionari. És a dir, la disminució de la densitat causada per l'expansió de l'Univers, que ja ningú negava, era compensada per la creació contínua de matèria, de manera que tant la densitat com qualsevol altra magnitud mesurable no variaven en el temps. Així s'aconseguia conjuminar les observacions de Hubble amb la vella idea grega d'un univers homogeni i immutable. Però aquesta vella idea del món que tothom es resistia tant a abandonar se'n va anar sobtadament en orris el 1965 quan els enginyers dels Laboratoris Bell, Arno Penzias i Robert Wilson, van detectar, sense ni tan sols saber de què es tractava, l'RCF predita cap als anys cinquanta pels físics nuclears Gamow, Alpher i Hermann.

La radiació còsmica de fons

Aquests científics havien demostrat que els diferents isotops dels elements lleugers com ara l'hidrogen, l'heli i el liti, podien haver-se format, amb les abundàncies còsmiques observades, en una fase molt primitiva de l'Univers dins el model de Friedmann. Com ja havia notat George Lemaître, en aquella fase inicial l'Univers havia de tenir densitats nuclears, és a dir, el fluid còsmic havia de ser una mena de sopa còsmica de protons i neutrons. En expandir-se i refredar-se, aquests nucleons s'haurien condensat en petits nuclis que els fotons, amb menor energia, ja no serien capaços de desintegrar. Una conseqüència inesperada d'aquesta idea de Gamow i col·laboradors era la predicció d'una radiació fòssil que ompliria avui dia l'Univers. Efectivament, en refredar-se encara més l'Univers, els nuclis haurien acabat per combinar-se amb els electrons lliures formant àtoms neutres que els fotons ja no haurien pogut ionitzar. Llavors els fotons haurien deixat d'interaccionar amb la matèria i s'haurien anat

refredant lentament fins a la seva temperatura actual d'uns quants kelvin.

El descobriment d'aquesta radiació va fer que el model de Friedmann i Lemaître, anomenat despectivament per Hoyle *model del Big Bang* —que podríem traduir com el Gran Espetec— acabés sent acceptat per tothom. Aquesta veritable revolució en la nostra concepció de l'Univers va quedar escenificada l'any 1978, quan Penzias i Wilson van rebre el Premi Nobel pel «seu» descobriment de l'RCF.

Tanmateix, el model del Big Bang encara era, per aquella època, a la corda fluixa. L'única base empírica sobre la qual se sustentava era l'edat finita de les galàxies, no gaire llunyana de la predita —amb gran incertesa encara— pel model, i la mateixa existència de l'RCF. Aquesta radiació tenia, doncs, un paper crucial. Malgrat tot, encara no estava del tot clar si, com calia esperar, aquesta radiació era veritablement isotropa, és a dir, mostrava la mateixa temperatura en totes les direccions, i si el seu espectre era el d'un cos negre a ~ 3 K. Ambdós aspectes eren molt difícils de comprovar empíricament perquè la radiació, a la freqüència de microones corresponent a la temperatura d'uns quants kelvin, és fortament absorbida per l'atmosfera terrestre. Per aquest motiu, el mateix any que la Reial Acadèmia Sueca de Ciències premiava Penzias i Wilson, Mather i Smoot es proposaven de tirar endavant un projecte espacial amb la finalitat d'intentar de comprovar de manera fefaent si l'RCF tenia totes les propietats esperades en el marc del model del Big Bang.

Unes observacions molt esperades

Com tot projecte espacial, el satèl·lit capaç de fer aquestes mesures encara trigaria deu anys a ser llançat. Deu anys són molts anys per a la ciència i la tecnologia a la nostra època, de manera que els coneixements teòrics van avançar molt i els detectors van millorar espectacularment les prestacions durant aquest temps.

A final dels anys noranta, ja se sabia que la radiació de fons no podia ser perfectament isotropa per dos motius. En primer lloc, la Terra no roman quieta, gira al voltant del Sol; aquest ho fa al voltant del centre de la Via Làctia; la Galàxia cau cap a la seva companya Andròmeda; aquestes ho fan cap al cúmul de Virgo, etc.; és a dir, la Terra es mou respecte al sistema de referència en el qual la radiació hauria d'aparèixer com a isotropa. Per tant, per efecte Doppler, la temperatura aparent de l'RCF hauria de ser més alta cap on apunta el nostre moviment i més baixa en el sentit oposat. S'esperava, doncs, una anisotropia dipolar, amb una amplitud $\Delta T/T$ de $\sim 10^{-3}$ i una direcció ben determinada. D'altra banda, l'Univers no és absolutament homogeni, presenta una estructura a «petites» escales: galàxies, cúmuls de galàxies, etc. Segons les teories més simples i, per tant, més versemblants, aquesta estructura s'hauria desenvolupat, per inestabilitat gravitatòria, a partir

de fluctuacions de densitat primordials, d'origen quàntic, extremadament petites però no nul·les, originades en el moment que es van formar les partícules subatòmiques. Per tant, quan l'RCF es va desacoblar de la matèria, 380.000 anys després de l'instant zero, ja hi havia d'haver unes petites fluctuacions de densitat que introduïssin petites variacions en la temperatura de la radiació —per efecte Doppler, per efecte gravitatori i per les mateixes fluctuacions en la densitat de fotons. Concretament, les prediccions eren que l'RCF havia de mostrar petites fluctuacions de temperatura en totes les direccions, d'una amplitud $\Delta T/T$ a nivell de quadrupol de $\sim 10^{-3}$, en cas que la densitat actual de l'Univers estigués dominada per partícules ordinàries, és a dir, bàsicament per neutrons i protons, o de $\sim 10^{-5}$, en cas que estigués dominada per matèria no ordinària, l'anomenada *matèria fosca freda*, com suggerien altres observacions.

D'altra banda, a nivell observacional, ja es començava a perfilar l'espectre de l'RCF, el qual semblava apartar-se lleugerament de la forma de Planck, tot i que no estava clar si les desviacions eren conseqüència de l'emissió de la Via Làctia o d'altres efectes extragalàctics no lligats a l'evolució de l'Univers. Però la situació més punyent era la referent a les anisotropies. L'anisotropia dipolar ja havia estat confirmada, però encara quedava per detectar la quadrupolar malgrat la sensibilitat de 10^{-4} d'alguns detectors com els situats a bord del satèl·lit soviètic *Relict-1*. En poques paraules, si amb la sensibilitat de 10^{-5} dels detectors a bord del satèl·lit COBE (*Cosmic Microwave Background Explorer*; figura 2) dissenyat per Mather, Smoot i col·laboradors tampoc s'arribés a detectar cap senyal, caldria abandonar la idea que es tenia en aquells moments sobre l'origen de l'estructura a l'Univers i possiblement també el mateix model del Big Bang! Així és que els resultats del satèl·lit COBE, llançat per fi el 1989, eren esperats amb impaciència. Passés el que passés, segur que donarien lloc a un altre Premi Nobel.

Els resultats del COBE

Els lectors ja es poden imaginar la resta de la història tot i que alguns detalls que possiblement ignoren són força interessants. Nou minuts després de començar a rebre les primeres dades del COBE, ja se sabia que l'espectre de l'RCF era el d'un cos negre perfecte, en tot cas molt més perfecte que el de qualsevol font de radiació coneguda, a una temperatura mitjana de $2,74 \pm 0,06$ K. Aquest primer descobriment va quedar immortalitzat en un fax enviat corrents per l'equip de científics al congrés de l'American Astronomical Society abans no es tanqués el termini de presentació de treballs. El valor definitiu d'aquesta temperatura seria de $2,726 \pm 0,01$ K com es mostra en la figura 3. Pel que fa a l'anisotropia, després d'acumular dades durant quatre anys, de corregir la contribució dipolar i l'emissió de la nostra Galàxia i fent la



Figura 2: Representació artística del satèl·lit COBE operant en òrbita. Al centre de la pantalla protectora dels raigs solars es poden veure els diferents instruments a bord: el FIRAS (Far Infrared Absolute Spectrophotometer) per mesurar l'espectre, el DIRBE (Diffuse Infrared Background Experiment) per mesurar l'emissió infraroja de la Galàxia i les dues banyes del DMR (Differential Microwave Radiometer) per mesurar les anisotropies de l'RCF de manera diferencial. (Cortesia de NASA/COBE Science Team)

mitjana a escales angulars de 7° , per fi es va poder contemplar el cèlebre mapa, representat en la figura 4, de les fluctuacions de temperatura de l'RCF, distribuïdes gairebé a l'atzar, però amb una desviació quadràtica mitjana de $47 \mu\text{K}$, just per sobre del soroll. Per fi s'havia detectat la famosa anisotropia quadrupolar, amb una amplitud de $17 \mu\text{K}$, tal com s'esperava. L'origen de l'estructura que presenta l'Univers era doncs el previst en el model del Big Bang per a un univers dominat per matèria fosca freda. Aquests són els descobriments premiats enguany amb el Nobel de Física.

Conseqüències d'aquests descobriments

Les dades obtingudes amb el COBE van mostrar que l'espectre de l'RCF és molt acuradament planckià, tal com s'esperava per a aquesta radiació fòssil predita pel model del Big Bang. D'altra banda també van mostrar que l'anisotropia en la temperatura d'aquesta radiació és plenament consistent amb la idea que l'estructura present avui dia a l'Univers s'ha desenvolupat, per inestabilitat gravitatòria, a partir de petites fluctuacions primordials de densitat com les que s'haurien produït amb l'aparició de les partícules subatòmiques en un univers dominat per matèria fosca no convencional segons els models anomenats *inflacionaris* proposats per descriure l'evolució de l'Univers a temps molt propers ($\sim 10^{-35}$ s)

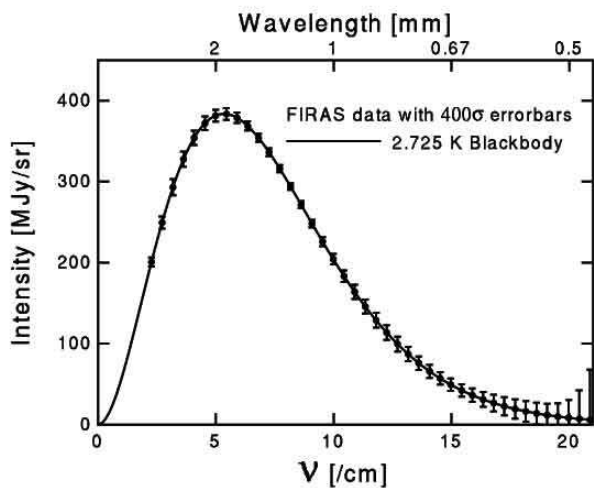


Figura 3: Espectre de l'RCF obtingut pel FIRAS (punts experimentals i barres d'error augmentades en un factor 400 per tal que es puguin apreciar), ajustat per un espectre de Planck (corba contínua) corresponent a una temperatura de 2,725 K. (Cortesia de NASA/COBE Science Team)

de l'instant zero.

Les conseqüències indirectes han estat igualment importants. Amb aquelles dades va quedar palès que l'anisotropia de l'RCF pot ser mesurada amb gran precisió. Això és de vital importància perquè l'espectre de potència angular de la temperatura de l'RCF —com l'espectre de potència habitual d'un senyal que varia en el temps, però atenent a la seva variació angular sobre l'esfera celeste— depèn fortament dels valors de tots i cada un dels paràmetres que fixen els detalls del model cosmològic, com ara la densitat total de l'Univers, la seva densitat de massa ordinària bàsicament associada als protons i neutrons, el ritme d'expansió de l'Univers o constant de Hubble, el veritable valor de la constant cosmològica, o densitat d'energia fosca, capaç d'accelerar l'expansió de l'Univers, etc. Per aquest motiu, des que es va llançar el COBE ja s'han programat dos satèl·lits similars més amb el propòsit de determinar aquell espectre de potència. Em refereixo als satèl·lits WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) i *Planck*. El primer, llançat també per la NASA el 2003, va significar l'entrada a l'era de la cosmologia de precisió atès que va permetre de determinar les propietats globals de l'Univers amb un error d'una centèsima (vegeu la figura 5), i va confirmar plenament l'existència d'una gran quantitat no solament de massa fosca sinó també d'energia fosca, l'origen de les quals encara és ara per ara completament desconegut. El segon, que serà llançat per l'ESA aquest mateix any 2007 o com a molt tard l'any vinent, permetrà d'avançar en els models inflacionaris, en el procés de formació de galàxies que es va iniciar quan l'Univers tenia 300

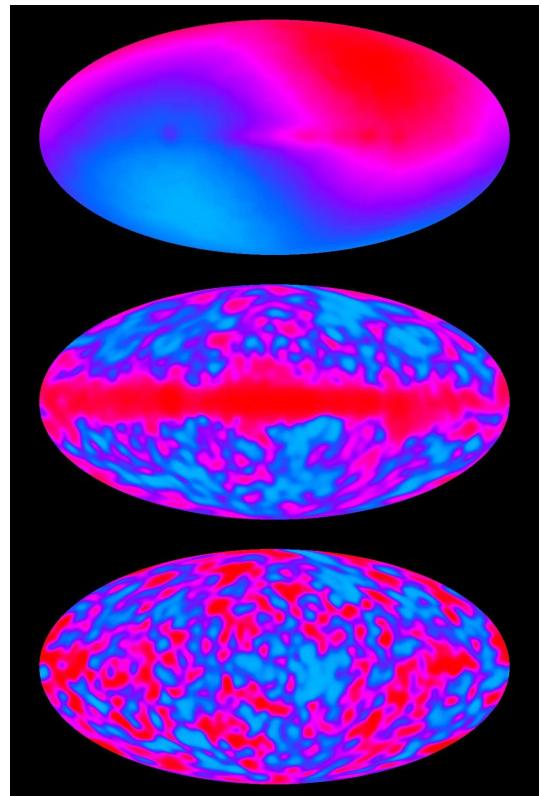


Figura 4: Mapa de la temperatura de l'RCF mitjanada en un angle sòlid de 7° obtingut pel DMR. Al panell superior es representen les dades brutes, el panell central recull les dades corregides de l'anisotropia dipolar, mentre que al panell inferior es pot veure el resultat final després de corregir també el de l'emissió de la nostra Galàxia. (Cortesia de NASA/COBE Science Team)

milions d'anys i en la reionització del medi intergalàctic que això va comportar.

Conclusions

De tot el que acabem de veure es desprèn que, com tots els bons descobriments, els que han dut a terme Mather, Smoot i col·laboradors obren més preguntes que no pas en tanquen. Aquests descobriments han representat el principi de l'era de la cosmologia de precisió, però això ha permès de constatar l'existència, a l'Univers, de grans quantitats de massa i energia fosques. Comprendre'n la composició demana, doncs, avançar en la comprensió de l'estructura de la matèria i les interaccions fonamentals. També és ben cert que han confirmat l'origen gravitatori de l'estructura que presenta l'Univers d'acord amb el que prediuen els models inflacionaris, però queda encara molt per recórrer abans que un d'aquests models no estigui plenament justificat. Finalment, a escala encara més general, no hi ha dubte que aquests descobriments han confirmat de manera definitiva el model del Big Bang

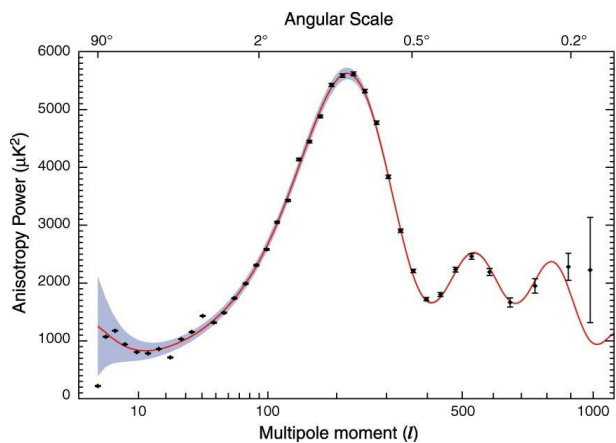


Figura 5: Espectre de potència angular de la temperatura de l'RCF obtingut pel WMAP (punts amb barres d'error) en el qual es poden apreciar els pics Doppler, l'ajust dels quals (corba contínua) permet de determinar les propietats globals de l'Univers amb precisions de la centèsima. En abscisses superiors, l'escala en graus corresponent de la freqüència angular; en abscisses inferiors, el corresponent moment multipolar del desenvolupament en harmònics esfèrics. (Cortesia de NASA/WMAP Science Team)

segons el qual l'Univers va tenir un inici en el temps. Només resta ara comprendre què vol dir exactament això.

Bibliografia

- MATHER, J. C. ET AL., A preliminary measurement of the cosmic microwave background spectrum by the Cosmic Background Explorer (COBE) satellite, *Astrophysical Journal*, **354**, L37–L40 (1990).
- MATHER, J., BOSLOUGH, J., *The Very First Light: The True Inside Story of the Scientific Journey Back to the Dawn of the Universe*, Basic Books (New York, 1996).
- SMOOT, G. F. ET AL., Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps, *Astrophysical Journal*, **396**, L1–L5 (1992).
- SMOOT, G. I DAVIDSON, K., *Arrugas en el tiempo*, Plaza y Janés (Barcelona, 1994).